

郭琪, 郭保党, 马燕, 等. 山药的活性成分与功能特性研究进展 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(19): 431-439. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090134

GUO Qi, GUO Baodang, MA Yan, et al. Recent Advances on Active Components and Functional Properties of Chinese Yam[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(19): 431-439. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090134

· 专题综述 ·

山药的活性成分与功能特性研究进展

郭琪¹, 郭保党¹, 马燕¹, 孙灵霞¹, 宋莲军¹, 黄现青¹, 杜耕安^{2,*}

(1. 河南农业大学食品科学技术学院, 河南郑州 450002;

2. 河南工业大学粮食和物资储备学院, 河南郑州 450001)

摘要: 山药作为一种药食同源的植物, 富含多糖、多酚、尿囊素、皂苷等多种生物活性成分, 这些生物活性成分赋予山药多种功能特性, 如抗氧化、抗糖尿病、抗肿瘤、免疫调节和缓解肠炎等。本文对目前不同品种产地山药中生物活性成分的提取方法、功能特性、发挥功能特性的主要机制等相关研究进行了综述; 对未来研究重点进行了展望。本文可为山药的精深加工利用及山药功能特性的进一步研究提供参考价值。

关键词: 山药, 活性成分, 功能特性, 研究进展

中图分类号: TS218

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)19-0431-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090134

本文网刊:



Recent Advances on Active Components and Functional Properties of Chinese Yam

GUO Qi¹, GUO Baodang¹, MA Yan¹, SUN Lingxia¹, SONG Lianjun¹, HUANG Xianqing¹, DU Geng'an^{2,*}

(1. The College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. School of Food and Strategic Reserves, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Yam as a medicinal and edible resource plant, is abundant in bioactive compounds including polysaccharides, polyphenols, allantoin, and saponins, these constituents endow yam with diverse functional properties, such as antioxidant, anti-diabetic, anti-tumor, immunomodulatory and alleviating enteritis effects. The extraction methods, functional properties, and the primary mechanisms through which these compounds exert their effects in different varieties of yams from various regions are reviewed, and the future research priorities are proposed to offer valuable insights for the advanced processing of yams and to inform further investigations into their functional characteristics.

Key words: Chinese yam; active components; functional properties; research progress

山药是薯蓣科草本植物的地下根茎, 其味甘、性平, 又称薯蓣、土薯、薯药等^[1]。据统计, 中国每年生产的山药量约有 500 多万吨^[2], 主要生产地区分布在我国西北、华北及长江流域等地^[3]。目前在我国有 11 个山药品种, 不同品种的山药成分及营养功能差异较大, 主要分布于河南、河北、山东、江西和广西地区, 其中河南地区主要品种为‘面’山药、‘乌鸡土’铁棍山药和‘沙土’铁棍山药; 河北地区主要品种为‘白玉’山药、‘棒槌’山药和‘陈集’铁棍山药; 江西地区

大多为‘紫’山药; 广西地区为含有花色苷的‘紫玉’山药^[4]。山药现阶段主要应用于药理学研究和功能性食品的研发, 深入研究山药的生物活性成分及其功能特性具有重要意义。

山药最早记载于《神农本草经》, 具有益气养阴、补脾健胃、生津益肺等多种功效, 在 2020 年 5 月山药被纳入中国国家卫生健康委员会发布的 COVID-19 中医康复治疗计划 (<http://www.nhc.gov.cn/wjw/index.shtml>)^[5], 现已被认为是一种药食同源的植

收稿日期: 2024-09-12

基金项目: 国家博士后研究人员计划 C 档 (GZC20230714)。

作者简介: 郭琪 (1994-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 农产品加工与保藏, E-mail: guoqi@henau.edu.cn。

* 通信作者: 杜耕安 (1991-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 食品安全, E-mail: wangyidga@163.com。

物。山药含有多糖、多酚、黄酮、尿囊素和皂苷等多种生物活性成分,不同生物活性成分具有不同的功效,山药中丰富的活性成分赋予其抗氧化、抗糖尿病、抗肿瘤、免疫调节、缓解肠炎等多种功能特性,目前主要通过动物模型和体外实验研究山药的功能特性及其作用机制^[6]。本文综述了近年来山药的活性成分和功能特性研究进展,为山药的生物学功能和营养特性深入研究和精深加工提供参考。

1 生物活性成分

山药中的主要生物活性成分为多糖、多酚、尿囊素、皂苷,其次还含有淀粉、氨基酸和花青素等。其中对多糖的研究最多,不同品种山药中多酚和尿囊素的含量差异较大。山药的根茎部位中皂苷含量较高,具有一定的药用价值。提高山药中生物活性成分的得率,是深度开发利用山药的有效手段之一。不同山药中主要活性成分含量及提取方法汇总于表 1。

1.1 多糖

山药多糖是山药中生物活性成分研究最多且最为广泛的一类化合物,具有免疫调节、抗肿瘤、降血

糖、降血脂、抗氧化、抗炎和抑菌等特性^[17-18],因山药多糖具有如前所述丰富的生物活性使其成为国内外的研究热点^[13]。山药多糖的干粉含量占 7.4%~13.5%,主要由甘露糖、阿拉伯糖、鼠李糖、木糖、葡萄糖、半乳糖及少量岩藻糖和葡萄糖醛酸组成^[19-20]。不同产地、不同提取和分离方法所得的山药多糖含量和结构、单糖组成及生物活性均有差异^[17-18],另外,使用不同衍生化工艺(硫酸化、羧甲基化、乙酰化、磷酸化、硒化等)对多糖进行不同程度的修饰可提高多糖的生物活性,扩大山药多糖的应用范围。

由于植物多糖被细胞壁包裹,因此必须开发一种对多糖破坏较小的高效提取方法^[5]。目前大多数提取山药多糖的方法包括热水提取、酸提取、碱提取、酶提取和超声辅助提取,分离纯化方法包括 DEAE-纤维素柱层析、葡聚糖凝胶柱层析和膜分离^[17]。

Zhou 等^[18]使用热水提取法提取来自重庆市的山药多糖,使用 DEAE-纤维素(醋酸型)柱层析进行分离纯化,所得山药多糖的提取率为 5.71%,总糖含量可达 80.65%,平均分子量为 7.28×10^4 Da,但热水

表 1 不同山药中主要活性成分含量及提取方法

Table 1 Contents and extraction methods of main active ingredients in different yams

活性成分	功能特性	山药产地/品种/部位	含量	提取方法	参考文献
多糖	抗氧化	河南怀山药	34.78%	微波辅助酶法	[3]
		河南焦作温县	10.6%	纤维素酶辅助法	[7]
	增强机体免疫	河南焦作怀山药	4.2%	浓碱提取法	[8]
	抗肿瘤	河北蠡县	44.24 mg/g	超声辅助提取法	[9]
	调节肠道菌群	河南焦作	33.11 mg/g		[9]
		湖北武穴	39.96 mg/g		[9]
	降血糖	河南铁棍山药	36.93 mg/g		[10]
	保肝护脾	湖北利川山药	44.34 mg/g	热水浸提法	[10]
		武穴佛手山药	36.08 mg/g		[10]
		武穴佛手山药	2.44 mg/g		[10]
多酚	抗氧化	湖北利川山药	2.89 mg/g	丙酮恒温提取法	[10]
	降血脂	河南铁棍山药	2.00 mg/g		[10]
	抗神经炎症	河南焦作温县铁棍山药皮	1.889%	闪式提取法	[11]
		台湾原生贡寮山药皮	4.33 mg/g	乙醇提取法	[12]
	保护神经	台湾原生贡寮山药肉	1.28 mg/g	乙醇提取法	[12]
		河南焦作山药肉	4.29 mg/g	乙醇微波辅助提取法	[13]
		河南焦作铁棍山药	0.460%		[14]
	伤口愈合	山东菏泽陈集山药	0.937%	超声辅助法	[14]
	治疗胃溃疡	湖北武穴佛手山药	0.497%		[14]
	降血糖	江西瑞昌南阳山药	1.030%		[14]
尿囊素	雌激素样作用	日本大和山药皮	4.54 mg/g	甲醇溶解超声提取法	[15]
		台湾紫山药皮	0.82 mg/g		[15]
		山西太谷山药	4.46 mg/g		[15]
	抗炎	武穴佛手山药	111.47 μg/g	乙醇回馏提取法	[10]
	消肿镇痛	湖北利川山药	449.78 μg/g		[10]
		河南铁棍山药	196.24 μg/g		[10]
	抗氧化	台湾山药块茎皮	582.53 μg/g		[16]
	降血脂	台湾山药块茎肉	227.86 μg/g	C ₁₈ 固相萃取法	[16]
	保护生殖系统	台湾山药根茎	29.39 μg/g		[16]
		台湾山药叶	24.41 μg/g		[16]
皂苷	抗肿瘤	台湾山药藤	23.96 μg/g		[16]

提取法存在提取时间长、提取温度高、效率低等缺点。Liu 等^[7]通过纤维素酶辅助法提取来自河南省焦作市温县山药多糖,所得山药多糖得率为 10.6%,用纤维素 DEAE-52 分离纯化出 3 种多糖组分(CYP1、CYP2 和 CYP3),其中 CYP3 表现出最强的抗氧化活性,CYP3 含有 5 种单糖,分别为阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖、甘露糖和半乳糖醛酸,应用甲基化和 NMR 分析发现,CYP3 的骨架由 1,2,4-连接的 D-Glcp 和 1,3,6-连接的 D-Glcp 组成,CYP3 可作为抗氧化剂在食品加工中得到应用。许春平等^[8]通过浓碱提取法对来自焦作怀山药种的多糖进行提取,所得山药多糖的提取率为 4.2%,其中主要的单糖成分为葡萄糖,占总单糖含量的 84.5%,山药多糖的分子量为 6.6×10^4 Da,通过硫酸酯化对山药多糖进行修饰,发现修饰后的山药多糖相比修饰前抗氧化效果更好。刘慧娟等^[9]选择了具有国家地理标志产品不同产地(河北蠡县、河南焦作和湖北武穴)的新鲜山药,通过超声辅助提取法收集多糖,其中河北蠡县的新鲜山药中多糖含量最高,为 44.24 mg/g,其次为湖北武穴,多糖含量为 39.96 mg/g,最少的是河南焦作,多糖含量为 33.11 mg/g,通过 LSD 多重比较发现不同产地的山药所含的多糖含量差异较大。

在山药所含的 4 类主要活性成分(总多糖、总皂苷、总黄酮和总多酚)中,山药多糖的含量最高,可达 90%,约占山药重量的 20%^[21]。在现有的山药活性成分文献中,针对山药多糖的活性研究也最多,不同的提取纯化方法对山药多糖的提取率、分子量、单糖组分均具有不同程度的影响,热水提取的提取率相对较高(0.5%~18%)^[22],该方法成本低廉,适合工业化大规模应用,但由于其高温处理,可能会使淀粉糊化而难以分离。酶辅助提取法具有纯度高、能耗低等优点,是实验室常用的高效提取方法,得到的多糖通常具有较好的乳化活性和高稳定性^[23]。超声辅助法提取时间短,能够减少淀粉的干扰,具有高提取率,但长时间的超声会改变多糖的高级结构,致使分子量降低^[24]。山药多糖的高效提取对深度开发利用山药多糖制得功能性产品具有重要意义。

1.2 多酚

多酚是一类含有一个或多个羟基取代物的化合物,包括黄酮、酚酸、单宁和花色苷等^[20],多酚不是山药中主要的化合物,但是在山药中也有关于黄酮类化合物、酚类和酚酸的报道,是山药中关键的抗氧化物质,在山药中的含量占比约 0.08%~0.11%^[6],类黄酮在山药多酚中占比最高,在 60% 以上^[20]。

不同种类山药多酚含量不尽相同,目前已知的地理性标志产品河南铁棍山药、湖北利川山药和武穴佛手山药中多酚含量最高的是利川山药(2.89 mg/g)^[19],而铁棍山药皮中为 1.889%^[11]。Sun 等^[25]首次使用高效液相色谱法(High performance liquid chromatography, HPLC)同时测定了山药中酚酸和三

萜类化合物的含量,结果显示,32 个批次的三萜类化合物和酚酸含量不同,其中,河北山药中地榆皂苷 I、儿茶素、没食子酸含量显著高于甘肃、山西;山西、黑龙江、山东三地没食子酸和儿茶素含量较高;内蒙古、江西、辽宁三地三萜含量较高。三萜类化合物和酚酸含量的差异受种植面积、生长环境、收获时间等多种因素的影响。

山药不同提取部位的多酚含量也存在较大差异,赵一霖^[12]通过优化不同因素水平,分别从山药皮和山药肉中提取多酚,结果表明山药肉中多酚含量为 1.41%,而山药皮中多酚含量达 4.58%。樊远星^[13]通过乙醇微波辅助提取法,提取得到去皮的山药粉中的多酚含量为 4.29 mg/g。杭书扬等^[26]通过超声波辅助法在铁棍山药皮中提取多酚,所得多酚得率为 0.519%,山药皮可能是山药中多酚含量最为丰富的部位^[6]。山药肉质颜色与总酚化合物含量相关,研究发现白肉山药中总酚化合物含量多于红肉山药,而红肉山药总酚化合物多于黄肉山药^[6]。目前针对山药多酚的提取大多采用超声辅助法,主要利用超声波的空化效应加快多酚进入溶剂的速度,从而尽可能地提高多酚的提取率。

不同山药的产地、部位所提取得到的多酚含量差异较大,多酚在决定山药的生物活性方面具有重要作用,山药中多糖和蛋白质的功能活性与多酚化合物密切相关。未来的研究将聚焦在各产地山药及其部位中所含多酚的含量和类型及其与其他大分子化合物的相互作用上,以准确了解山药的生物活性。

1.3 尿囊素

尿囊素是咪唑类化合物,无毒无味^[13],是评价山药品质的指标之一,具有镇痛麻醉、抗刺激、去腐生肌等功效,可促进伤口和皮肤溃疡的愈合^[27]。廖晓铃等^[14]检测了 4 个地区(河南焦作的‘铁棍山药’、山东菏泽的‘陈集山药’、湖北武穴的‘佛手山药’和江西瑞昌的‘南阳山药’)山药的尿囊素含量,发现铁棍山药的尿囊素含量最低,南阳山药的尿囊素含量最高,且比铁棍山药高出 124%。董亚辉^[15]发现不同品种山药皮中的尿囊素的含量差别较大,日本大和山药皮中的尿囊素含量较高,为 4.54 mg/g,而台湾紫山药皮中的尿囊素含量较低,为 0.82 mg/g。薯蓣种(中国南方的野生瑞昌山药和栽培瑞昌山药,中国北方的栽培铁棍山药)中尿囊素含量明显高于参薯种(取自中国南方的龙岩山药和安远山药)^[28]。

将山药软化切制可得山药饮片,此过程称为炮制,炮制过程会使山药中尿囊素的含量下降。河南武陟和温县的山药原料中尿囊素含量为 0.48%,将其炮制处理得到山药饮片后,山药饮片中尿囊素含量为 0.32%^[29],对不同批次山药验证发现炮制过山药饮片含量均有显著下降,平均下降 0.16%,其可能原因是在软化切制前的水处理环节中尿囊素有所损失,因此建议山药饮片加工遵循“少泡多润”原则。

尿囊素在山药中的含量较少,对其高效提取为医学的辅助治疗提供新途径,现阶段的研究多集中于不同产地和部位的山药中尿囊素含量的检测及对比,而对山药中尿囊素成分的提取方法研究较为单一,因此未来的研究可集中于尿囊素高效提取方法的探究。山药加工方式的不同可能会引起尿囊素含量的变化,因此在研发山药相关的功能性产品时,需着重探究加工方式使尿囊素含量变化的具体原因,由此给出最佳的产品使用建议。

1.4 皂苷

皂苷是次生代谢产物,分为三萜类和类固醇糖苷两大类^[30],具有抗癌、抗血栓、抗菌、抗病毒、治疗低胆固醇血症和低血糖等功效^[30-31]。皂苷在食品中常用作天然表面活性剂和防腐剂,以控制食品的微生物腐败^[30]。近年来对皂苷的活性研究及应用主要集中在药理和制药领域,文献调研发现在山药根茎中的皂苷含量最丰富,约占其中化学成分的 50% 以上^[31]。山药不同部位中皂苷的含量不同,山药块茎皮层的皂苷含量最高(582.53 $\mu\text{g/g}\cdot\text{dw}$),是块茎肉中皂苷含量(227.86 $\mu\text{g/g}\cdot\text{dw}$)的 2.55 倍。山药根茎、叶片和藤蔓中皂苷含量分别为 29.39、24.41 和 23.96 $\mu\text{g/g}\cdot\text{dw}$ ^[16]。

采收时间对山药中皂苷的含量也有影响。不同时间收获的山药各部位(除根茎外)总皂苷含量依次为:1 月>12 月>2 月>11 月>3 月。12 月份采收的根茎中皂苷含量高于 1 月份采收的。各部位总皂苷含量最高的依次为:块茎皮层(619.79 $\mu\text{g/g}\cdot\text{dw}$)>块茎果肉(247.84 $\mu\text{g/g}\cdot\text{dw}$)>根茎(32.19 $\mu\text{g/g}\cdot\text{dw}$)>叶(26.57 $\mu\text{g/g}\cdot\text{dw}$)>藤本植物(25.06 $\mu\text{g/g}\cdot\text{dw}$)^[32]。皂苷的测定方法是分析不同产地山药中皂苷含量差异的关键手段。刘影等^[33]使用硫酸显色法测定了浙江紫山药中所含的皂苷含量为 2.14%,龚菲菲^[1]以铁棍山药和乡淮山药为原材料,通过液相色谱法测定了两种山药的含水量和皂苷含量,对比分析铁棍山药(含水量:82.01%,皂苷含量:0.0446%)和乡淮山药(含水量:71.35%,皂苷含量:0.0845%)所测指标,发现铁棍山药适宜食用,而乡淮山药的药用价值更高。

由于皂苷几乎不溶于水(0.02 mg/L),山药皂苷的提取方法受到限制,在体内的生物利用度不高,阻碍了它的开发和利用,目前工业上常通过合适的宿主进行异源生物合成。皂苷具有重要的药用价值,提高山药中皂苷的提取率,并探究皂苷的剂量和结构与活性之间的关系,对临床治疗和干预具有重要意义。

1.5 其他成分

山药中除了含有多酚、多糖、皂苷、尿囊素等活性成分外,还有生物碱、蒽醌类、薯蓣碱、 γ -氨基丁酸、淀粉、氨基酸、菲醌类、花青素、熊果苷等成分。淀粉在山药块茎中含量丰富,约占 75%~84%^[34],平均粒径为 22.72 μm ^[35],其中抗性淀粉占干块茎重量的 50%^[36],具有调节肠道菌群和糖脂代谢的功能。氨基酸在山药块茎中含量较高、组分较齐全,总氨

基酸含量为 7.21~8.71 g/100 g,必需氨基酸占比为 27.86%~34.89%,其中精氨酸(20.77 g/100 g)和谷氨酸(26.18 g/100 g)含量最高^[37]。在山药的石油醚和乙酸乙酯提取物中分离到了固醇(3 个)、异香豆素(1 个)、氨基酸(1 个)、二苯基庚烷(2 个)、酚类衍生物(1 个),这些活性成分对肺癌细胞株具有显著抗肿瘤活性^[38]。

2 功能特性

山药中富含的多种生物活性成分赋予其多种功能特性,如图 1 所示,国内外研究较为集中的功能特性主要包括抗氧化、抗糖尿病、抗肿瘤、免疫调节和缓解肠炎等,此外对降血脂、大脑损伤保护、缓解腹泻等功能特性也有少量的研究。



图 1 山药中主要活性成分及其功能特性

Fig.1 Main active ingredients and their functional properties in yam

2.1 抗氧化

山药中丰富的生物活性成分赋予山药较强的抗氧化活性,可作为新型抗氧化剂。研究显示,山药的抗氧化活性主要来自其含有的多酚、多糖、皂苷、花青素等物质,山药多糖对 DPPH 自由基、羟基自由基和超氧自由基均表现出有效的清除能力,另外,经山药多糖处理子宫内皮细胞后,抗凋亡蛋白 Bcl-2 上调,而 Bax 蛋白水平减弱,导致 Bax/Bcl-2 比值下调,证明山药多糖能够明显促进子宫内皮细胞的增殖^[39]。多糖的修饰作用可以提高抗氧化活性水平,磷酸化修饰后的山药多糖对羟基自由基的清除能力可达到维生素 C 的水平^[18]。提取方法也会影响山药多糖的抗氧化能力,Zhao 等^[40]分析了热水提取法、酸提法、热压缩水提法、酶辅助法提取的怀山药多糖的抗氧化效果,结果表明酸提法多糖对 DPPH 自由基的清除能力最强,其原因可能是糖醛酸含量的升高,而热水提取法多糖对羟基自由基的清除能力最高,其原因可能是半乳糖醛酸含量的升高。

除山药多糖具有抗氧化活性外,其他山药成分也具有一定的抗氧化能力,紫山药中的花青素、多糖和薯蓣皂苷元也具有明显的抗氧化能力,其中花青素对 DPPH 自由基的清除能力比维生素 C 强,而紫山药多糖和薯蓣皂苷元对 DPPH 自由基的清除能力均比维生素 C 弱;花青素和紫山药多糖对羟基自由基的清除能力均比维生素 C 强,薯蓣皂苷元对羟基自由基的清除能力比维生素 C 弱^[41]。王彦平等^[41]以雌性果蝇为模型,通过急性实验探究发现 2.0 和 4.0 mg/mL 浓度的紫山药提取物可以显著提高超氧化物歧化酶、过氧化氢酶活力,降低丙二醛含量,并显著上调 *SOD*、*CAT* mRNA 表达水平,显著下调 *Methuselah* mRNA 表达水平,以此延长果蝇寿命,对抗衰老有积极作用。杭书扬等^[26]从山药皮中提取了多酚和黄酮粗提物,在一定的浓度区间,随着粗提物浓度的增加,抗氧化能力逐渐增强,粗提物对羟基自由基的清除能力($IC_{50}=0.083$ mg/mL)相比 DPPH 自由基($IC_{50}=0.158$ mg/mL)更强,当粗提物浓度为 1.0 mg/mL 时,羟基自由基清除率为 81.84%、DPPH 自由基清除率为 79.95%、还原力为 0.7、抗氧化能力为 0.68。

众多研究证明山药中的生物活性成分(特别是山药多糖)均具有较强的抗氧化能力,且部分抗氧化能力能达到与维生素 C 相同或更高水平,另外山药多糖的抗氧化能力具有浓度依赖性,主要抗氧化机制是调节系统相关酶的活性、清除自由基和提高抗衰老相关基因的表达^[6]。目前针对山药多糖的抗氧化活性研究是国内外的研究热点,多糖的抗氧化活性本质是其结构中的 α -1,4-葡萄糖苷键的还原能力^[2]。

2.2 抗糖尿病

山药多糖及山药中其他潜在物质能够起到抗糖尿病效果,山药可能是糖苷酶抑制剂的新来源,Zhang 等^[42]从山药块茎中分离出 4 种(反式-N-p-香豆酰酪胺、1,7-双(4-羟基苯基)庚烷-3,5-二醇、6-羟基-2,4,7-三甲氧基、顺式-N-p-香豆酰酪胺)化合物,可以抑制 α -葡萄糖苷酶的活性。张松松^[43]以纳米材料负载 α -葡萄糖苷酶,用于提取分离河南怀山药中的 α -葡萄糖苷酶抑制剂,为糖尿病的预防和治疗提供更多可能性。山药多糖能够明显降低小鼠空腹血糖、空腹血清胰岛素、胰岛素抵抗指数,并提高小鼠肠道中的丙酸、丁酸等短链脂肪酸的含量^[44]。蔡羽等^[45]建立了 2 型糖尿病小鼠模型,发现铁棍山药粗多糖(抑制率 18.85%)和佛手山药粗多糖(抑制率 15.73%)对 α -葡萄糖苷酶均有抑制作用,其中铁棍山药粗多糖主要是通过清除 PTIO 自由基、降低肝糖原的分解、增强过氧化氢酶和谷胱甘肽过氧化物酶的活性发挥抗糖尿病作用,而佛手山药粗多糖主要是通过清除 DPPH 自由基、降低甘油三酯的含量、增强超氧化物歧化酶与过氧化氢酶活性来发挥抗糖尿病作用。

山药多糖主要是通过影响代谢酶的活性和相关代谢产物、调节胰岛素水平来降低体内血糖指数。山药中的皂苷成分主要基于体重的变化、碳水化合物消化和转运酶的活性、肠道形态的改变、血脂的变化、脂质过氧化的减少以及与糖尿病相关的肝损伤的预防,从而使皂苷在糖尿病管理中发挥重要作用^[46]。山药中的尿囊素活性成分可以改善维持正常胰岛素和葡萄糖水平的 β 细胞的功能,通过调节抗氧化活性、脂质分布并促进胰高血糖素样肽 1 的释放发挥抗糖尿病作用^[47]。

早期山药中的活性成分对抗糖尿病的研究主要集中于山药中皂苷成分,现针对山药多糖的抗糖尿病研究越来越多,山药多糖可能是预防和治疗糖尿病的候选药物,而对山药中其他活性成分抗糖尿病的研究报道较少,对山药中已知的各个活性成分的抗糖尿病全面研究仍具有很大的提升空间。

2.3 抗肿瘤

薯蓣皂苷元及其糖苷衍生物对多种细胞系具有抗增殖活性,诱导细胞凋亡,Hernandez-Vazquez 等^[48]通过体外试验发现,在宫颈 HeLa 和 CaSki 癌细胞系中,(25R)-螺质-5-烯-3 β -基 O- β -D-吡喃葡萄糖苷和(25R)-螺质-5-烯-3 β -基 O- α -L-鼠李糖吡喃糖基-(1 $\rightarrow$ 4)- β -D-吡喃葡萄糖苷的活性低于薯蓣皂苷元,但(25R)-螺质-5-烯-3 β -基 O- α -L-鼠李糖吡喃糖基-(1 $\rightarrow$ 2)-O-[α -L-鼠李糖吡喃糖基-(1 $\rightarrow$ 4)]- β -D-吡喃葡萄糖苷的活性高于薯蓣皂苷元。另外相比皂苷元而言,皂苷元糖苷是更好的细胞凋亡诱导剂,葡萄糖和鼠李糖残基在增强皂苷元的凋亡活性中起着核心作用。皂苷及其糖苷衍生物对淋巴细胞的增殖潜力的影响程度低于癌细胞。薯蓣皂苷及其糖苷衍生物是具有低坏死活性和选择性作用的化合物,因此可作为抗癌化合物之一。

研究发现 M2 样肿瘤相关巨噬细胞具有免疫抑制性和促肿瘤性,薯蓣皂苷能够抑制 M2 巨噬细胞群的增加,利用体外细胞培养系统发现薯蓣皂苷激活 JNK 并抑制 STAT3 诱导巨噬细胞发生 M1 极化,同时抑制 JNK 并激活 STAT3 发生 M2 极化,薯蓣皂苷可能通过 JNK 和 STAT3 通路抑制肺癌中的肿瘤相关巨噬细胞,从而发挥抗肿瘤作用^[49]。泛素-蛋白酶体系统可能会调控肿瘤细胞的细胞周期,使得肿瘤细胞生长更快,通过靶向干预泛素-蛋白酶体系统途径失调可能是一种抗肿瘤的策略。李欣茹等^[50]在 UbG76V-GFP 报告系统筛选发现薯蓣皂苷是一种新型的泛素-蛋白酶体系统抑制剂,用 Ub-AMC 底物发现薯蓣皂苷能够抑制细胞内去泛素化酶的活性,薯蓣皂苷可以增强细胞内泛素化水平,对肿瘤细胞的增殖具有抑制作用,证明薯蓣皂苷靶向泛素-蛋白酶体能够显著抑制肿瘤细胞的增殖。山药中的皂苷活性成分对肿瘤细胞的增殖具有抑制作用,其抗肿瘤机制主要是在不同的通路中抑制肿瘤细胞的生长、繁殖和

入侵,最终诱导细胞凋亡^[2]。寻找促进肿瘤细胞生长的细胞或途径,对这种细胞或途径进行靶向干预是一种抗肿瘤的新策略。

山药不同部位的尿囊素、总黄酮和总酚的抗肿瘤活性差异较大,在 Ehrlich 腹水瘤小鼠模型和 H22 肝癌肿瘤小鼠模型中,山药皮中活性成分的抗肿瘤特性均优于山药肉,其主要原因是所提取的山药皮中的尿囊素、总黄酮和总酚含量高于山药肉^[51]。山药多糖可以抑制人肝癌 HepG2 细胞、人胃癌 SGC7901 细胞、人宫颈癌 HeLa 细胞和人前列腺癌 DU145 细胞的增殖^[52],增强 T 淋巴细胞和 NK 细胞的增殖和分化,增加脾淋巴细胞和巨噬细胞中 IL-2 和 TNF- α 的水平^[53]。山药多酚可以抑制结直肠癌的生长,山药多酚浓度越大,对葡聚糖硫酸钠诱导的小鼠结肠癌抑制效果越好,表现出较高的浓度依赖性^[54]。

目前针对山药中多种活性成分的抗肿瘤作用是一项研究热点,其中皂苷和多糖两种活性成分的抗肿瘤作用研究最多,且能够抑制多种类型的肿瘤细胞的生长,研究报道山药中的尿囊素和多酚成分也具有抗肿瘤作用,因此山药作为一种药食同源的植物,有可能成为有效治疗癌症的潜在代替药物。

2.4 免疫调节

山药中多糖活性成分能够通过非特异性免疫调节免疫功能,其调节机制主要是促进巨噬细胞和脾细胞分泌的生物活性分子(如白细胞介素、干扰素和肿瘤坏死因子)的产生、影响巨噬细胞中丝裂原活化蛋白激酶(MAPK)和核因子(NF)- κ B 信号通路,改善巨噬细胞、NK 细胞和树突状细胞的活性,同时增强抗体的分泌。除此以外,山药中的营养物质和微量元素能够促进肠道促炎因子 IL-1 β 水平的升高、有益菌丰度的增加和有害菌丰度的减少,从而通过调节肠道菌群的方式提高免疫力。

Li 等^[55]从山药中分离出纯多糖,通过体外体内实验发现山药纯多糖显著升高 RAW264.7 细胞分泌的 NO、白细胞介素-6 和肿瘤坏死因子- α 水平,另外,山药纯多糖还通过增加免疫功能低下小鼠的免疫器官指数和血清因子分泌而发挥免疫调节作用。对山药多糖进行不同程度的硒化可引起免疫调节活性的变化,以 RAW264.7 巨噬细胞和鼠脾细胞作为细胞模型,山药多糖、硒化山药多糖-1(硒含量为 715 mg/kg)和硒化山药多糖-2(硒含量为 1545 mg/kg)均具有体外免疫调节作用,与山药多糖相比,较低剂量水平(5 μ g/mL)的硒化山药多糖-1 和硒化山药多糖-2 更加提高了吞噬细胞的活性,增加了小鼠脾细胞中 T 淋巴细胞亚群的 CD4/CD8 比值,促进巨噬细胞中白细胞介素-6、IL-1 β 和肿瘤坏死因子- α 的表达,另外,硒化山药多糖-2 在细胞中的生物活性比硒化山药多糖-1 更具潜力^[56]。因此使用微量元素 Se 在较低的硒化程度下对山药多糖化学修饰能够对巨噬细胞和脾细胞表现出更高的免疫调节活性。

2.5 缓解肠炎

山药中的多糖、多酚、皂苷均可以缓解结肠炎症状,山药多糖能够改善葡聚糖硫酸钠诱导的小鼠结肠炎症状,增强 IL-10 的产生,抑制细胞因子(IL-1 β , TNF- α)并降低过氧化物酶活性,另外,山药多糖还能够通过提高黏蛋白 MUC-2、ZO-1 和闭合蛋白的表达来维持肠道的完整性,从而降低血清中脂多糖结合蛋白和内毒素的含量及肝脏中的氧化应激^[57]。山药中的多酚提取物能够有效缓解硫酸葡聚糖钠诱导的结肠炎,减少 TNF- α 、IL-6、IL-1 β 、IL-17A、CXCL1、MCP-1 等促炎细胞因子的产生,且多酚提取浓度越高,抑制效果越好^[54]。通过靶向巨噬细胞极化来恢复免疫平衡是溃疡性结肠炎的一种潜在治疗策略,Wu 等^[58]发现薯蓣皂苷可以改善结肠炎,减少巨噬细胞 M1 极化,显著促进小鼠结肠 M2 极化。另外薯蓣皂苷可以抑制有氧糖酵解,促进巨噬细胞脂肪酸氧化,其机制可能是 mTORC1/HIF-1 α 和 mTORC2/PPAR- γ 信号的调节作用。

2.6 其他功能活性

山药除了具有抗氧化、抗糖尿病、抗肿瘤、免疫调节和缓解肠炎的功效之外,还具有降血脂^[59]、大脑损伤保护^[60]、缓解腹泻^[61]、促进伤口愈合^[62]、调节内分泌失调^[63]等作用,山药中的活性成分和其具有的活性功效不仅仅是一对一作用,更多的是多种成分的协同和多种功效的相互促进、相互调节作用。

在对高脂饮食喂养的小鼠进行山药多糖干预后,发现短链脂肪酸产生菌-毛螺菌、*Lachnospiraceae* NK4A136 group、*Ruminococcaceae* UCG-014 的丰度增加,脱硫弧菌(*Desulfovibrio*)和瘤胃球菌(*Ruminococcus*)的丰度及精氨酸、丙酰肉碱和别异亮氨酸的代谢产物减少。山药多糖可能通过调节肠道环境影响肥胖小鼠的脂质代谢^[59]。山药多糖能够通过抑制神经元细胞凋亡、提高脑组织抗氧化能力、抑制相关炎症因子表达来减少缺血引起的脑梗死体积。山药多糖对大鼠脑缺血再灌注损伤的保护作用呈剂量依赖性,2、3 g/kg 浓度的山药多糖显著减少大鼠脑梗死面积,TUNEL 阳性细胞数显著减少,脑组织氧化应激水平中,SOD 和 GSH 的含量显著升高,MDA 含量显著下降,且显著降低了炎症因子(IL-10、IL-1 β 、TNF- α)水平^[60]。山药中的腺苷和熊果苷均具有雌激素作用,其中腺苷主要由雌激素受体 ER α 和 ER β 介导,熊果苷主要由雌激素受体 ER β 和 GPR30 介导^[63]。

3 总结与展望

山药是一种药食同源的植物,其内部成分的结构复杂且庞大。近年来,山药中活性成分的挖掘和功能特性的研究已经取得一定的进展,其中,山药多糖和多酚的提取和生物学活性研究比较深入,对尿囊素和皂苷等其他分子的研究多集中于药用价值,其保护肝脏、降血糖、抗肿瘤、抗炎、降尿酸和免疫调

节等药理学功效逐渐被挖掘,但是仍需要深入解析这些物质对健康功效的作用机制。山药在医疗保健和疾病治疗中具有很大的应用前景,但存在诸多亟待解决的问题: a.不同产地的山药多糖结构性质和功能差异较大,对山药多糖的高级结构解析较少,没有建立完善的构效关系。b.现阶段对山药中活性成分的主要提取方法多为超声波辅助法、微波辅助酶法和乙醇提取法,提取方式相对单一,提取效率不高,探索高效提取新技术是深度开发利用山药的关键手段。c.目前针对山药功能成分的生物活性研究多停留在药效层面,作用机制有待深入探索。未来的研究应关注高纯度功能成分的制备工艺及结构的解析,对应药效的靶点分析,功能成分在体内的吸收、分布、代谢、排泄过程及作用机制等方面,有助于健康功效药物的开发和临床应用,在保健品和药品等行业具有良好的市场发展前景。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 龚菲菲. 山药活性成分及营养功能研究进展[J]. *工业微生物*, 2024, 54(1): 107–109. [GONG F F. Research progress on active ingredients and nutritional functions of yam[J]. *Industrial Microbiology*, 2024, 54(1): 107–109.]
- [2] 林晓丽, 郎凯瞳, 郑宝东, 等. 山药营养功能特性及其产品开发现状[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(6): 339–346. [LIN X L, LANG K T, ZHENG B D, et al. Nutritional functional characteristics of yam and current status of product development[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(6): 339–346.]
- [3] 赵小亮, 龙则宇, 鲁雲, 等. 山药中部分活性物质的功效研究与应用进展[J]. *浙江农业学报*, 2024, 36(4): 920–931. [ZHAO X L, LONG Z Y, LU Y, et al. Progress in research and application of some active substances in yam[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2024, 36(4): 920–931.]
- [4] 赵磊. 鲜切山药黄色素的形成条件、结构组成及色素性质研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020. [ZHAO L. Research on the formation conditions, structural composition and pigment properties of yellow pigment in fresh-cut yam[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.]
- [5] LI Y, JI S, XU T, et al. Chinese yam (*Dioscorea*): Nutritional value, beneficial effects, and food and pharmaceutical applications[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2023, 134: 29–40.
- [6] 崔艺钊, 张璐佳, 丰宇, 等. 山药活性成分及营养功能研究进展[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(7): 372–383. [CUI Y F, ZHANG L J, FENG Y, et al. Research progress on active ingredients and nutritional functions of yam[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(7): 372–383.]
- [7] LIU X, GU L, ZHANG G, et al. Structural characterization and antioxidant activity of polysaccharides extracted from Chinese yam by a cellulase-assisted method[J]. *Process Biochemistry*, 2022, 121: 178–187.
- [8] 许春平, 孙懿岩, 白家峰, 等. 怀山药多糖的提取、硫酸酯化修饰及抗氧化活性研究[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(3): 50–55. [XU C P, SUN Y Y, BAI J F, et al. Study on the extraction, sulfation modification and antioxidant activity of yam polysaccharides[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 40(3): 50–55.]
- [9] 刘慧娟, 吴其国, 郭晓军, 等. 不同产地山药根际土壤微生物群落结构及多糖含量的差异性[J]. *济宁医学院学报*, 2024, 47(2): 83–89. [LIU H J, WU Q G, GUO X J, et al. Differences in microbial community structure and polysaccharide content in rhizosphere soil of yam from different origins[J]. *Journal of Jining Medical College*, 2024, 47(2): 83–89.]
- [10] 黄梦甜, 胡安阳, 张正茂, 等. 不同产地山药功能成分的比较[J]. *湖北工程学院学报*, 2018, 38(6): 30–34. [HUANG M T, HU A Y, ZHANG Z M, et al. Comparison of functional components of yam from different origins[J]. *Journal of Hubei Institute of Engineering*, 2018, 38(6): 30–34.]
- [11] 孟月丽, 张庆岭. 铁棍山药皮中多酚类化合物体外抗氧化作用研究[J]. *中医学报*, 2016, 31(5): 707–710. [MENG Y L, ZHANG Q L. Study on the antioxidant effect of polyphenols in yam peel *in vitro*[J]. *Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2016, 31(5): 707–710.]
- [12] 赵一霖. 原生贡察山药多酚提取物抗氧化性质的研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2014. [ZHAO Y L. Study on the antioxidant properties of polyphenol extracts from native Gongliao yam[D]. Ningbo: Ningbo University, 2014.]
- [13] 樊远星. 山药多糖、多酚提取及山药奶酒发酵工艺研究[D]. 新乡: 河南科技学院, 2018. [FAN Y X. Study on the extraction of yam polysaccharides and polyphenols and fermentation technology of yam milk wine[D]. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2018.]
- [14] 廖晓铃, 陈运中, 付小雨, 等. 反相 HPLC 法测定 4 种不同产地山药中尿囊素含量[J]. *农业机械*, 2013(11): 81–84. [LIAO X L, CHEN Y Z, FU X Y, et al. Determination of allantoin content in yam from four different origins by reversed-phase HPLC[J]. *Agricultural Machinery*, 2013(11): 81–84.]
- [15] 董亚辉. 山药不同品种形态、生理、产量和品质比较研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2020. [DONG Y H. Comparative study on morphology, physiology, yield and quality of different yam varieties[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2020.]
- [16] LIN J T, YANG D J. Determination of steroidal saponins in different organs of yam (*Dioscorea pseudojaponica* Yamamoto)[J]. *Food Chemistry*, 2008, 108(3): 1068–1074.
- [17] GUO Y, LIU F, ZHANG J, et al. Research progress on the structure, derivatives, pharmacological activity, and drug carrier capacity of Chinese yam polysaccharides: A review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 261(Pt 2): 129853.
- [18] ZHOU S, HUANG G, CHEN G. Extraction, structural analysis, derivatization and antioxidant activity of polysaccharide from Chinese yam[J]. *Food Chemistry*, 2021, 361: 130089.
- [19] FAN Y J, HE Q Y, LUO A S, et al. Characterization and anti-hyperglycemic activity of a polysaccharide from *Dioscorea opposita* Thunb roots[J]. *International Journal Molecular Sciences*, 2015, 16(3): 6391–6401.
- [20] 刘昕玥, 王凤忠, 范蓓, 等. 不同品种山药的健康功效研究进展[J]. *中国食物与营养*, 2024, 30(3): 42–47, 55. [LIU X Y, WANG F Z, FAN B, et al. Research progress on the health benefits of different varieties of yam[J]. *Chinese Food and Nutrition*, 2024, 30(3): 42–47, 55.]
- [21] 金一宝, 佟月, 陈佳佳, 等. 中药山药及其伪品主要化学成分比较分析[J]. *药学研究*, 2024, 43(3): 249–254. [JIN Y B, TONG Y, CHEN J J, et al. Comparative analysis of the main chemical com-

- ponents of Chinese yam and its counterfeit products[J]. *Pharmaceutical Research*, 2024, 43(3): 249–254.]
- [22] LI M, CHEN L X, CHEN S R, et al. Non-starch polysaccharide from chinese yam activated RAW264.7 macrophages through the toll-like receptor 4 (TLR4)-NF- κ B signaling pathway[J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 37: 491–500.]
- [23] LIU X, YAN Y, LIU H, et al. Emulsifying and structural properties of polysaccharides extracted from chinese yam by an enzyme-assisted method[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 111: 242–251.]
- [24] CUI R, ZHU F. Ultrasound modified polysaccharides: A review of structure, physicochemical properties, biological activities and food applications[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 107: 491–508.]
- [25] SUN J H, GAN C L, HUANG J, et al. Determination of triterpenoids and phenolic acids from *Sanguisorba officinalis* L. by HPLC-ELSD and its application[J]. *Molecules*, 2021, 26(15): 4505.]
- [26] 杭书扬, 杨林霄, 郭建行, 等. 山药皮中黄酮、多酚提取工艺优化及其抗氧化活性[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(20): 122–127. [HANG S Y, YANG L X, GUO J X, et al. Optimization of extraction process of flavonoids and polyphenols from yam peel and their antioxidant activity[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(20): 122–127.]
- [27] 樊靓, 汤尚文, 余海忠, 等. 山药中尿囊素研究进展[J]. *现代农业科技*, 2015(3): 308–317. [FAN L, TANG S W, YU H Z, et al. Research progress of allantoin in yam[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2015(3): 308–317.]
- [28] SHAN N, WANG P T, ZHU Q L, et al. Comprehensive characterization of yam tuber nutrition and medicinal quality of *Dioscorea opposita* and *D. alata* from different geographic groups in China[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2020, 19(11): 2839–2848.]
- [29] 刘雪东, 杨光明, 李伟东, 等. 山药道地药材和饮片中原囊素的含量比较[J]. *中医药信息*, 2009, 26(5): 36–37. [LIU X D, YANG G M, LI W D, et al. Comparison of allantoin content in authentic Chinese yam and its decoction pieces[J]. *Information on Traditional Chinese Medicine*, 2009, 26(5): 36–37.]
- [30] CHEOK C Y, SALMAN H A K, SULAIMAN R. Extraction and quantification of saponins: A review[J]. *Food Research International*, 2014, 59: 16–40.]
- [31] 范晓阳, 侯彦婕, 贾世艳, 等. 山药化学成分及皂苷类成分药理作用的研究进展[J]. *中医药信息*, 2021, 38(9): 79–84. [FAN X Y, HOU Y J, JIA S Y, et al. Research progress on chemical components of yam and pharmacological effects of saponins[J]. *Information on Traditional Chinese Medicine*, 2021, 38(9): 79–84.]
- [32] LIN J T, CHEN S L, LIU S C, et al. Effect of harvest time on saponins in yam (*Dioscorea pseudojaponi*)[J]. *Journal of Food and Drug Analysis*, 2020, 17(2): 13.]
- [33] 刘影, 史姗姗, 汪财生. 浙江紫山药营养成分及薯蓣皂苷元含量测定[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(9): 4563–4564. [LIU Y, SHI S S, WANG C S. Determination of nutritional components and diosgenin content in Zhejiang purple yam[J]. *Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(9): 4563–4564.]
- [34] YU B, LI J, TAO H, et al. Physicochemical properties and *in vitro* digestibility of hydrothermal treated Chinese yam (*Dioscorea opposita* Thunb.) starch and flour[J]. *International Journal of Biological Macromolecules: Structure, Function and Interactions*, 2021, 176: 177–185.]
- [35] EPPING J, LAIBACH N. An underutilized orphan tuber crop-Chinese yam: A review[J]. *Planta*, 2020, 252(4): 58.]
- [36] 王丽霞, 王敬臻, 张金玲, 等. 长山山药淀粉的制备及性能[J]. *食品科学*, 2017, 38(9): 156–161. [WANG L X, WANG J Z, ZHANG J L, et al. Preparation and properties of yam starch from Changshan County[J]. *Food Science*, 2017, 38(9): 156–161.]
- [37] 朱会丽, 杨静, 马欢, 等. 不同品种山药氨基酸组成成分分析及综合评价[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(3): 293–300. [ZHU H L, YANG J, MA H, et al. Analysis and comprehensive evaluation of amino acid composition of different varieties of yam[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2024, 15(3): 293–300.]
- [38] LI X, ZHAO C, JING S, et al. Novel phenanthrene and isocoumarin from the rhizomes of *Dioscorea nipponica* Makino subsp. *rosthornii* (Prain et Burkill) C. T. Ting (Dioscoreaceae)[J]. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 2017, 27(15): 3595–3601.]
- [39] JU Y, XUE Y, HUANG J, et al. Antioxidant Chinese yam polysaccharides and its pro-proliferative effect on endometrial epithelial cells[J]. *International Journal of Biological Macromolecules: Structure, Function and Interactions*, 2014, 66: 81–85.]
- [40] ZHAO Z, WANG L, RUAN Y, et al. Physicochemical properties and biological activities of polysaccharides from the peel of *Dioscorea opposita* Thunb extracted by four different methods[J]. *Food Science and Human Health*, 2023, 12(1): 130–139.]
- [41] 王彦平, 陈月英, 袁社锋, 等. 河南紫山药功能成分抗氧化、抗衰老活性研究[R]. 郑州: 河南农业职业学院, 2016. [WANG Y P, CHEN Y Y, YUAN S F, et al. Study on the antioxidant and anti-aging activities of the functional components of Henan purple yam[R]. Zhengzhou: Henan Agricultural Vocational College, 2016.]
- [42] ZHANG L, BAI B, LIU X H, et al. Glucosidase inhibitors from Chinese yam (*Dioscorea opposita* Thunb.)[J]. *Food Chemistry*, 2011, 126(1): 203–206.]
- [43] 张松松. α -葡萄糖苷酶微反应器的制备及其应用初步研究[D]. 开封: 河南大学, 2018. [ZHANG S S. Preparation and preliminary study of α -glucosidase microreactor and its application[D]. Kaifeng: Henan University, 2018.]
- [44] 管琦, 易恒炜, 吕碧君, 等. 山药多糖对2型糖尿病小鼠胰岛素抵抗的影响及作用机制[J]. *食品科学技术学报*, 2023, 41(3): 64–71. [GUAN Q, YI H W, LÜ B J, et al. Effects of yam polysaccharides on insulin resistance in type 2 diabetic mice and its mechanism of action[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2023, 41(3): 64–71.]
- [45] 蔡羽, 植飞, 陈运中, 等. 铁棍/佛手山药粗多糖的抗糖尿病作用效果比较[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(4): 10–18. [CAI Y, ZHI F, CHEN Y Z, et al. Comparison of the anti-diabetic effects of crude polysaccharides from iron stick/foshou yam[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2022, 38(4): 10–18.]
- [46] OMORUYI F O. Jamaican bitter yam sapogenin: Potential mechanisms of action in diabetes[J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2008, 63(3): 135–140.]
- [47] GO H K, RAHMAN M, KIM G B, et al. Antidiabetic effects of yam (*Dioscorea batatas*) and its active constituent, allantoin, in a rat model of streptozotocin-induced diabetes[J]. *Nutrients*, 2015, 7(10): 8532–8544.]
- [48] HERNANDEZ-VAZQUEZ J M V, LOPEZ-MUNOZ H, ESCOBAR-SANCHEZ M L, et al. Apoptotic, necrotic, and antiproliferative activity of diosgenin and diosgenin glycosides on cervical cancer cells[J]. *European Journal of Pharmacology*, 2020, 871: 172942.]
- [49] CUI L, YANG G, YE J, et al. Dioscin elicits anti-tumour im-

munity by inhibiting macrophage M2 polarization via JNK and STAT3 pathways in lung cancer[J]. *Journal of Cellular and Molecular Medicine*, 2020, 24(16): 9217–9230.

[50] 李欣茹, 王嘉琦, 柯细松, 等. 薯蓣皂苷靶向泛素-蛋白酶体的抗肿瘤活性研究[J]. *肿瘤防治研究*, 2023, 50(6): 567–572.

[LI X R, WANG J Q, KE X S, et al. Study on the anti-tumor activity of diosgenin targeting ubiquitin-proteasome[J]. *Cancer Research*, 2023, 50(6): 567–572.]

[51] LIU Y, LI H, FAN Y, et al. Antioxidant and antitumor activities of the extracts from Chinese yam (*Dioscorea opposita* Thunb.) flesh and peel and the effective compounds[J]. *Journal of Food Science*, 2016, 81(6): H1553–H1564.

[52] 石亿心, 于莲, 翟美芳, 等. 纳米山药多糖对 4 种肿瘤细胞的作用[J]. *中国现代应用药学*, 2016, 33(8): 967–971. [SHI Y X, YU L, ZHAI M F, et al. Effects of nano-yam polysaccharide on four types of tumor cells[J]. *Chinese Modern Applied Pharmacy*, 2016, 33(8): 967–971.]

[53] HAO L, ZHAO X. Immunomodulatory potentials of the water-soluble yam (*Dioscorea opposita* Thunb) polysaccharides for the normal and cyclophosphamide-suppressed mice[J]. *Food and Agricultural Immunology*, 2016, 27(5): 667–677.

[54] YANG X Y, WANG Q, ZHANG X, et al. Purple yam polyphenol extracts exert anticolicitis and anticolicitis associated colorectal cancer effects through inactivation of NF- κ B/p65 and STAT3 signaling pathways[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(32): 12177–12189.

[55] LI P, JING Y, QIU X, et al. Structural characterization and immunomodulatory activity of a polysaccharide from *Dioscorea opposita*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 265(pt 1): 130734.

[56] GUAN Q, LIN Y, LI L, et al. *In vitro* immunomodulation of the polysaccharides from yam (*Dioscorea opposita* Thunb.) in re-

sponse to a selenylation of lower extent[J]. *Foods*, 2021, 10(11): 2788.

[57] LU H, SHEN M, CHEN Y, et al. Alleviative effects of natural plant polysaccharides against DSS-induced ulcerative colitis via inhibiting inflammation and modulating gut microbiota[J]. *Food Research International*, 2023, 167: 112630.

[58] WU M, WANG Q, HUANG B, et al. Dioscin ameliorates murine ulcerative colitis by regulating macrophage polarization[J]. *Pharmacological Research*, 2021, 172: 105796.

[59] FENG X, GUO M, LI J, et al. The structural characterization of a novel Chinese yam polysaccharide and its hypolipidemic activity in HFD-induced obese C57BL/6J mice[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 265(pt 2): 130521.

[60] 彭啸宇, 石崢, 梁晨, 等. 山药多糖对大鼠脑缺血再灌注损伤的保护作用[J]. *中药药理与临床*, 2019, 35(2): 60–63. [PENG X Y, SHI Z, LIANG C, et al. Protective effect of yam polysaccharide on cerebral ischemia-reperfusion injury in rats[J]. *Pharmacology and Clinical Medicine of Traditional Chinese Medicine*, 2019, 35(2): 60–63.]

[61] ZHANG N, LIANG T, JIN Q, et al. Chinese yam (*Dioscorea opposita* Thunb.) alleviates antibiotic-associated diarrhea, modifies intestinal microbiota, and increases the level of short-chain fatty acids in mice[J]. *Food Research International*, 2019, 122: 191–198.

[62] 尹倩薇, 涂沛楠, 谢保城. 尿囊素的药理作用机制研究进展[J]. *现代药物与临床*, 2022, 37(12): 2897–2901. [YIN Q W, TU P N, XIE B C. Research progress on the pharmacological mechanism of allantoin[J]. *Modern Drugs and Clinic*, 2022, 37(12): 2897–2901.]

[63] ZENG M, ZHANG L, LI M, et al. Estrogenic effects of the extracts from the Chinese yam (*Dioscorea opposita* Thunb.) and its effective compounds *in vitro* and *in vivo*[J]. *Molecules*, 2018, 23(2): 11.